SCHICHTABSTAND UND SCHICHTPOTENTIALDIFFERENZ IN DER POSITIVEN GLIMMENTLADUNG.

INAUGURAL-DISSERTATION

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT LEIPZIG

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

VORGELEGT

VON

FRIEDRICH WEHNER

AUS SORNZIG.

LEIPZIG,

JOHANN AMBROSIUS BARTH

1910.

Angenommen von der math.-naturwissenschaftlichen Sektion auf Grund der Gutachten der Herren

Wiener und Des Coudres.

Leipzig, den 9. Dezember 1909.

Der Procancellar
K. Rohn.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Inhalt.

Seite

I. **Der Schichtabstand** 5
1. Versuchsanordnung 6
2. Vorversuche 8
a) Der Eintritt der Entladung 8
b) Der Scheitelabstand 8
c) Verschiedene Beobachtungen 11
3. Schichtabstand und Stromstärke 19
4. Schichtabstand und Druck 25
5. Schichtabstand und Rohrradius 30
Ergebnisse 32
II. **Die Schichtpotentialdifferenz** 33
1. Versuchsanordnung 34
a) Die Art der Sonden 34
b) Die Bestimmung der Potentialdifferenzen 37
2. Die Diagramme 39
3. Schichtpotentialdifferenz und Stromstärke 45
4. Schichtpotentialdifferenz und Druck 45
5. Schichtpotentialdifferenz und Rohrweite 51
Ergebnisse 52

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546804_0068

I. Der Schichtabstand.

Vorbemerkung.

Die ersten umfangreichen Messungen der Schichtabstände in Abhängigkeit von den verschiedenen sie bestimmenden Faktoren wurden von Goldstein[1]) ausgeführt. Er beschreibt die Hauptergebnisse seiner Untersuchungen mit folgenden Worten: „Für Zylinderröhren von verschiedener Weite ändert sich das mittlere Schichtintervall zwischen denselben Gasdrucken stets in demselben Verhältnis . . . Wenn die Gasverdünnungen in einer geometrischen Reihe zunehmen, so wachsen die Schichtintervalle sehr nahe auch in einer geometrischen Reihe. Die Exponenten beider Reihen sind aber nicht identisch."

Wenn l die mittleren Schichtabstände und p die Drucke bedeuten, so kann man das von Goldstein ausgesprochene Gesetz in der von J. J. Thomson[2]) gebrauchten Form schreiben:

$$\frac{l}{l_0} = \left(\frac{p_0}{p}\right)^m.$$

Da nach Goldstein die Schichtabstände viel langsamer wachsen als die Verdünnungen, so ist der Exponent m kleiner als 1.

Goldstein beobachtete ferner, daß die Schichtabstände mit wachsender Rohrweite zunehmen, also auch Funktion der Rohrradien (r) sind. Wir setzen daher $l_0 p_0^m = f(r)$. Damit geben wir der Beziehung zwischen Schichtabstand und Druck folgende Form:

$$l = \frac{f(r)}{p^m}.$$

---

1) E. Goldstein, Berliner Ber. 1881. p. 877 ff.
2) J. J. Thomson, Cond. of El. thr. Gases, 2. Aufl. p. 565.

Der Zweck vorliegender Untersuchungen ist in erster Linie die Bestimmung des Exponenten m und der Funktion $f(r)$.

1. Versuchsanordnung.

Die Versuche wurden vorgenommen in Zylinderröhren von 10—300 mm Durchmesser. Die Länge der Rohre war entsprechend der Rohrweite möglichst groß gewählt, damit eine genügend große Anzahl von Schichten bei den Messungen zur Verfügung stand. Der Elektrodenabstand betrug 1 m bei engen bis $2^1/_2$ m bei weiten Rohren. Die Rohre mit Durchmessern von 10—80 mm waren geblasen, während zwei Rohre von 200 und 300 mm Durchmesser aus 50 bzw. 40 cm langen gegossenen Zylindern zusammengesetzt wurden mittels ebener Schliffe. Als Dichtung erwies sich der von Hertz angegebene Kitt aus Kolophonium und Baumöl sehr brauchbar, so daß sich das Vakuum etwa eine Woche lang auf 0,1 mm halten konnte.

Als Elektroden wurden zunächst Aluminiumsiebe verwendet, die den ganzen Rohrquerschnitt ausfüllten. Da sich jedoch bei hohen Stromstärken die erste Kathodenschicht häufig auch hinter der Kathode durch die Durchbohrungen der Siebe hindurch ausbreitete und so eine wesentliche Störung der Schichtenbildung in der positiven Säule hervorrief, indem sich gewissermaßen zwei sich gegenseitig störende Systeme von Schichten ausbildeten, wurden späterhin Aluminiumvollkugeln von 2 und 1 cm Durchmesser verwendet. Diese erwiesen sich jedoch nur bis zu Stromstärken von etwa 50 Milliamp. geeignet. Bei stärkerem Strom wich infolge der zunehmenden Erwärmung der Kathode und ihrer Umgebung der Scheitel des positiven Lichts nach der Anode hin zurück, so daß während der Messung die Schichten nicht an derselben Stelle blieben. Das Messen der Schichtabstände wurde dadurch sehr erschwert. Daher wurden als Kathoden Aluminiumhohlzylinder von 10 und 15 cm Länge und 1,5—4 cm Durchmesser (je nach der Rohrweite) eingesetzt. Zur Vermeidung der starken Erwärmung an der Kathode wurde bei engeren Rohren die Zylinderkathode in einer Glaskugel angebracht, an die dann die Zylinderrohre mit kugelförmigen Anoden angesetzt wurden.

Zum Evakuieren diente eine rotierende Quecksilberluftpumpe nach Gaede. Zwischen dieser und dem Entladungsrohr befand sich das Trockengefäß mit P_2O_5. Der Druck wurde mit einem McLeodmanometer von 500 ccm Inhalt gemessen. Als Stromquelle dienten zwei Hochspannungs-Gleichstromdynamos von Siemens & Schuckert mit je 5000 Volt Spannung und 0,1 Amp. Maximalstrom. Die Stromstärke wurde durch die Sondererregung der Dynamomaschinen reguliert. Als Vorschaltwiderstand lagen im Hochspannungsstromkreis 30 Manganinwiderstände von Rustrat für 0,05 Amp. mit je 10000 Ohm, die für Ströme von mehr als 50 Milliamp. zu je zwei parallel geschaltet werden konnten. Für Ströme von über 100 Milliamp. (bei Parallelschaltung der Maschine) erwies sich eine Säule fließenden Leitungswassers von 12,5 qcm Querschnitt mit verschiebbaren Zinkelektroden als hinreichender Widerstand.

An Gasen wurden verwendet: käuflicher Stickstoff, Sauerstoff aus $KMnO_4$, Kohlensäure aus $NaHCO_3$ und käuflicher Wasserstoff. Die Entladungsrohre wurden vor den Messungen zweimal mit dem betreffenden Gas gefüllt.

Zur Bestimmung der Schichtabstände wurde der Abstand von je 5 oder 10 Schichten zusammen gemessen und dann die Mittelwerte genommen. Die Anzahl der berücksichtigten Schichten schwankte je nach dem Gasdruck zwischen 5 und 60. Der erste (von der Kathode aus gerechnet), gewöhnlich größere Schichtabstand wurde für die Mittelwerte nicht mit berücksichtigt.

Zur genauen Bestimmung der Schichtgrenzen wurde anfangs ein Diopter verwendet; bei Wasserstoff spiegelten sich die scharf begrenzten Schichtköpfe in der gegenüberliegenden Rohrwand, so daß sich die Fehler der Parallaxe ohne Diopter vermeiden ließen. Der Druck wurde vor und nach Bestimmung der Schichtabstände gemessen. Der zum Antrieb der Dynamos dienende 2 HP-Motor war anfangs an das städtische Netz angeschlossen. Die Schwankungen des Netzes riefen aber infolge der durch Änderung der Tourenzahl bedingten Spannungsänderung wesentliche Fehler in den Resultaten der Messungen hervor, so daß es sich nötig machte, den Motor an die Institutsbatterie anzuschließen.

2. Vorversuche.

a) Der Eintritt der Entladung.

Der Eintritt der selbständigen Entladung wird bestimmt durch Druck, Elektrodenspannung, Rohrweite und Natur des Gases. Dabei wirken in gleichem Sinne Erhöhung der Elektrodenspannung, Erniedrigung des Druckes und Verminderung des Querschnittes. Ferner tritt unter sonst gleichen Verhältnissen die Entladung in Wasserstoff bei höherem Druck ein als in Stickstoff oder Kohlensäure. Außerdem wird der Entladungseintritt durch Kapazitätsänderung der Rohrwände, besonders in der Umgebung der Kathode, beeinflußt. Anlegen oder bloßes Annähern der Hand kann einen Eintritt der Entladung schon bei höherem Druck bewirken, als es den betreffenden Verhältnissen entsprechen würde.

b) Der Scheitelabstand.[1] [2]

Der Abstand des Scheitels der positiven Säule von der Kathode bleibt unter sonst gleichen Verhältnissen derselbe, wenn man den Elektrodenabstand ändert. Die Größe des Scheitelabstandes ist aber abhängig von Druck, Stromstärke und Rohrdurchmesser. Für zwei Rohrdurchmesser von 4 und 6 cm wird diese Abhängigkeit durch folgende Diagramme dargestellt, in denen die einzelnen Kurven die Abhängigkeit des Scheitelabstandes von der Stromstärke bei konstanten Drucken angeben.

Der Scheitelabstand hat also bei konstantem Druck mit wachsendem Strom ein Maximum, welches für niedrigere Drucke bei niedrigeren Stromstärken liegt, und wächst mit der Rohrweite.

In dem erwähnten Maximum ist ein Anhalt gegeben zur Untersuchung der Beziehung zwischen Scheitelabstand und Druck. Nach den vorliegenden Beobachtungen scheint die Funktion, Maximum des Scheitelabstandes (bei veränderlichem Strom)–Druck, linear zu sein. Sie wurde jedoch nicht näher untersucht, da die Messung des Scheitelabstandes nur zur

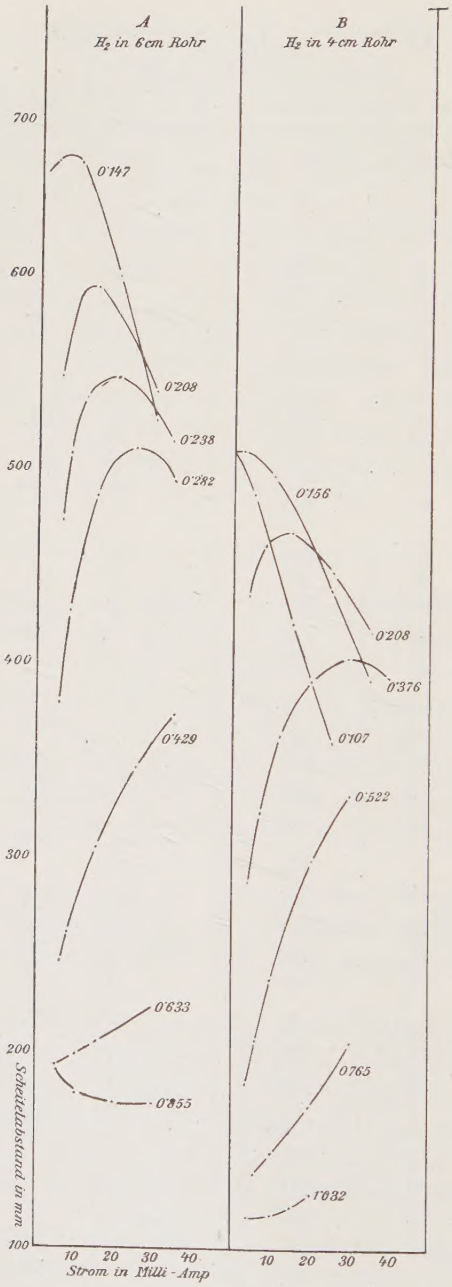
1) E. Riecke, Ann. d. Phys. **16.** p. 294 u. 303. 1905.
2) J. Stark, Elektrizität in Gasen 1904. p. 141.

Tabelle I. Vgl. Kurventafel I.

(Stromstärke–Scheitelabstand.)

p = Druck in mm; i = Stromstärke in M.-A.; S = Scheitelabstand in cm.

Füllung H_2; Rohrradius 30 mm (A).			H_2; 20 mm (B).		
p	i	S	p	i	S
0,855	5	192	1,032	4	117
	10	180		6	117
	20	176		10	117
	30	175		15	121
				20	128
0,633	5	195	0,765	6	139
	10	200		10	149
	15	207		20	173
	20	211		30	206
	30	226			
0,429	5,7	248	0,522	3,5	183
	8	263		6	208
	15	306		10	239
	25	348		20	300
	35	376		30	333
0,282	5,6	381	0,376	4	489
	8	427		7	324
	15	488		12	364
	25	512		20	392
	35	495		30	404
				40	394
0,238	6	474	0,208	4	438
	8	509		8	462
	12	538		15	468
	20	548		25	448
	34	515		35	417
0,208	5,7	549	0,156	2,5	510
	15	595		10	498
	30	540		25	438
				35	393
0,147	4,9	660	0,107	1	506
	10	660		5	488
	20	600		15	420
	30	527		25	360



Kurventafel I.

allgemeinen Orientierung über die Dimensionen der zur Untersuchung der Schichtung zu verwendenden Rohre diente. Für eine einwandfreie Messung des Scheitelabstandes sind folgende Faktoren zu berücksichtigen: Da der Scheitelabstand jedenfalls von der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen abhängig ist, also auch von deren Ablenkung beeinflußt wird, so muß erstens die Kathode genau zentriert sein, damit die Kathodenstrahlen sich symmetrisch zur Rohrachse ausbreiten. Unsymmetrie der Entladung verkürzt den Scheitelabstand. Zweitens muß jeder andere die Symmetrie störende Einfluß vermieden werden. Dieser kann in einer Kapazitätsänderung der Rohrwand und im Vorhandensein eines senkrecht zu den Kathodenstrahlen ausgebildeten Magnetfeldes (Erdfeld!) bestehen. Selbst wenn ein solches Magnetfeld konstant bleibt, darf es nicht vernachlässigt werden, da sich ja mit Strom und Druck die Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen ändert.

c) Verschiedene Beobachtungen.

Der Scheitelabstand der positiven Säule von der Kathode wird in hohem Grade geändert durch Ablenkung der Kathodenstrahlen mittels eines magnetischen Feldes. Wird ein Magnetfeld senkrecht zur Rohrachse in der Nähe des negativen Glimmlichtes erzeugt, so schiebt sich bekanntlich infolge Ablenkung der Kathodenstrahlen die positive Säule nach der Kathode hin mehr oder weniger vor, je nach dem Grade der Ablenkung. Daran läßt sich also die Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen beurteilen. Sie ist bei niederen Drucken bedeutend größer als bei höheren und in Sauerstoff unter sonst gleichen Verhältnissen bedeutend geringer als in Wasserstoff. Bei äußerst niederen Drucken ist in Wasserstoff die Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen so groß, daß schon verhältnismäßig kleine Magnetfelder eine wesentliche Verschiebung des Scheitels der positiven Säule nach der Kathode hin hervorrufen. So wurde ein deutlicher Einfluß des Erdfeldes auf die Entladung in folgender Weise festgestellt:

Es wurde beobachtet, daß bei Annäherung eines Magnets an die Kathode eines horizontal liegenden Rohres von 8 cm Durchmesser der Scheitel der positiven Säule zunächst nach der Anode um eine Länge von etwa 15 cm zurückweicht, bei

weiterer Annäherung aber normalerweise sich wieder nach der Kathode hin vorschiebt. Kehrte man die Pole des Magnets um, so daß der +-Pol senkrecht über den —-Pol zu liegen kam, dann blieb die Erscheinung aus. Der Vorgang deutet an, daß durch den Magnet irgend eine Einwirkung kompensiert wird.

Das Feld der den Strom liefernden Maschinen konnte nicht Ursache sein, da Verkehren der Maschinenpole die Erscheinung nicht änderte. Die Vermutung, es könne eine Unsymmetrie der Entladung, veranlaßt durch die Beschaffenheit des Rohres, vorliegen, wurde dadurch als unbegründet erwiesen, daß das Rohr bei festgehaltenem Magnet um die Längsachse gedreht wurde, wobei die Erscheinung dieselbe blieb. Um einen etwaigen Einfluß des Erdfeldes zu erkennen, wurde das Rohr 5 m von den Maschinen entfernt und in der Horizontalebene gedreht. Dies bewirkte keine wesentliche Änderung des beobachteten Vorganges. Stellte man aber das Rohr vertikal, so war die Ablenkung bedeutend geringer. Bei einer Drehung in der Meridianebene konnte man auch ohne Magnet direkt ein Vorrücken und Zurückweichen der positiven Säule beobachten, je nachdem die Röhre parallel dem Erdfeld stand (Minimum der Ablenkung) oder senkrecht dazu (Maximum).

Die horizontale Komponente des Erdfeldes ist bedeutend kleiner als die vertikale, daher die geringere Ablenkung in der Vertikalstellung als in der horizontalen Lage. Da zudem bei horizontaler Lage des Rohres der Scheitel der positiven Säule nur dann bei Annäherung des Magnets zurückwich, wenn das Feld des künstlichen Magnets dem Erdfeld entgegengesetzt war, so lassen diese Versuche den Schluß zu, daß das Erdfeld die Entladung durch Ablenkung der Kathodenstrahlen nicht unbedeutend beeinflußt.

Bei der Entladung in Stickstoff in einem Rohr von 4 cm Weite wurde bei 0,186 mm Druck und 15 Milliamp. Strom folgende Erscheinung bemerkt: Gleitet man mit der Hand am Rohre entlang, so folgen die Schichten der Hand, während ein schwächeres System von Schichten stehen bleibt. Es treten zwei gegeneinander bewegliche Schichtsysteme auf. Anlegen der Hand verringert die Schichtabstände im ganzen positiven Licht, hauptsächlich die der benachbarten Schichten.

Bei niederen Drucken ist die Entladung gegen äußere Einflüsse überhaupt sehr empfindlich. So wird z. B. der Scheitel der positiven Säule nach der Anode hin getrieben, wenn man die Hand an die Rohrwand vor der Kathode legt, während gleichzeitig ein Sinken der Stromstärke zu beobachten ist. Bei äußerst niedrigen Drucken kann auf diese Weise die Entladung vollständig zum Verschwinden gebracht werden. Es tritt also der entgegengesetzte Fall ein wie bei höheren Drucken, wo der Entladungseintritt durch Anlegen der Hand vorzeitig hervorgerufen wird. — Berührt man die Rohrwand vor dem Scheitel der positiven Säule nach der Kathode hin, so wird dieser gewissermaßen von der Hand angezogen, wobei jedoch das wolkige Glimmlicht sich von der Rohrwand zurückzieht, und so seinen Querschnitt verringert, an Lichtintensität aber zunimmt. Ganz besonders augenfällig sind diese Wirkungen bei folgendem eigenartigen Phänomen zu beobachten, welches den Righischen Leuchtmassen ähnlich ist und auch von M. Toepler[1]) beobachtet wurde:

In ein Rohr von 8 cm Durchmesser, welches mit CO_2 gefüllt war, wurde während der Entladung Leuchtgas gebracht. Beim Zutreten des Leuchtgases zog sich, wie gewöhnlich beim Ansteigen des Druckes, das positive Glimmlicht auf einen

Fig. 1.

schmalen Streifen in der Rohrachse zusammen. Nach weiterem Steigen des Druckes zerfiel dieser Streifen in pilz- oder pfeilförmige Lichtgebilde von etwa 15 cm Länge, deren Zahl mit wachsendem Druck von 1 auf 5 stieg, in der Weise, daß diese Gebilde gleichsam aus der Anode herauswuchsen. Es wurde dann untersucht, ob die Erscheinung auch in anderen Gasen auftritt, und gefunden, daß sie sich am besten in Gasgemischen oder stark verunreinigten Gasen ausbildet, und zwar meist dann, wenn sich in dem Gemisch Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffe und Sauerstoff befinden. Vorstehende Skizze (Fig. 1) mag zunächst eine genauere Vorstellung von der Erscheinung geben.

1) M. Toepler, Isis 1. p. 17ff. 1898.

Diese leuchtenden „Pilze“, wie wir sie in Unterscheidung von den gewöhnlichen Schichten nennen wollen, standen meist nicht ruhig, sondern wurden von der Anode gleichsam nach der Kathode hin geschossen. Sie erreichten jedoch die Kathode nicht, sondern erloschen etwa 30 cm von ihr entfernt, worauf dann unter Ansteigen der Stromstärke je ein neuer Pilz aus der Anode hervorkam. Die Geschwindigkeit der Pilze ließ sich durch die Stromstärke regulieren. Meist war es auch möglich, auf diese Weise die Pilze zum Stillstehen zu bringen, so daß sich Angaben über ihren gegenseitigen Abstand machen lassen.

Druck in mm Hg	Strom in Milliamp.	Zahl der Pilze	Gegenseitiger Abstand der Pilze		
			1.—2.*	2.—3.	3.—4.
5,6	40	1	—	—	—
4,3	40	2	38 cm	—	—
2,9	50	4	22 cm	23,5 cm	26,5 cm

* Die Pilze sind von der Anode aus gezählt.

Wenn die Pilze still standen, so erwärmte sich die Rohrwand in ihrer Umgebung sehr stark.

Wie die gewöhnliche Entladung bei niederen Drucken gegen äußere Einflüsse sehr empfindlich ist, so auch die bei relativ hohen Drucken auftretenden Pilze. Legt man die Hand um das Rohr, so werden die benachbarten ruhenden Pilze angezogen und von der weitergleitenden Hand gewöhnlich eine Strecke weit mitgenommen, bis sie dann erlöschen (wobei neue aus der Anode kommen) oder plötzlich an ihren ursprünglichen Standort zurückschnellen. Umgekehrt lassen sich die bewegten Pilze mit der Hand gleichsam festhalten, und zwar in der Weise, daß alle Pilze stillstehen, wenn einer von ihnen zur Ruhe gebracht ist. Dieser eine kriecht dann gewissermaßen in die von der Hand umspannte Stelle des Rohres hinein, wobei seine Leuchtmasse von der Rohrwand abgestoßen wird und sich nach der Rohrachse hin verdichtet.

Über das Wesen dieser Pilze läßt sich nur so viel sagen, daß sie mit der gewöhnlichen Schichtung der positiven Säule

nichts gemein haben. Das folgt erstlich aus ihrem verhältnismäßig großen Abstand und dessen Abnahme mit abnehmendem Druck (die Schichtabstände nehmen mit abnehmendem Druck zu). Zweitens kann man unter Umständen beobachten, daß die Pilze in sich besonders geschichtet sind, welches letztere der eigentlichen Schichtung entsprechen würde. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß die beschriebene Erscheinung eine Begleitung chemischer Vorgänge im Entladungsrohr ist; denn wenn man wenig Stickstoff zu Wasserstoff bei relativ hohem Druck zutreten läßt, so bilden sich solche Pilze zunächst an dem Rohrende, an dem der Stickstoff zugetreten ist. Nach kurzer Zeit verlieren sie die karminrote Farbe, welche der Stickstoffentladung eigen ist, und verschwinden dann allmählich ganz, indem sie sich zu einem leuchtenden Band vereinigen. Erst bei erneutem Zutreten von Stickstoff treten neue Pilze auf, die aber in gleicher Weise wieder verschwinden. Nur in Gasgemischen, die Sauerstoff frei oder in Verbindung (CO_2) enthalten, blieb die Erscheinung dauernd und konnte in einem abgeschmolzenen Rohr nach etwa einem Jahre noch gut beobachtet werden.

Diese Beobachtung des Auftretens von pilzartigen Gebilden bringt, abgesehen von der Schichtung der Pilze in sich, die ja den deutlichsten Beweis dafür liefert, daß man es hier mit einem von der Schichtung verschiedenen Phänomen zu tun hat, gegenüber den Beobachtungen von M. Toepler nichts wesentlich Neues; nur wurde hier die Erscheinung bei niedrigeren Drucken und stärkeren Strömen erhalten und durch Verwendung von verschiedenen Gasen und Gasgemischen festgestellt, daß das Auftreten von Lichtpilzen durch das Vorhandensein mehrerer Gase bedingt wird und hauptsächlich von der Gegenwart von Sauerstoff abhängig zu sein scheint.

Es wurde Schichtenbildung bei allen Rohren von 10 bis 300 mm Durchmesser beobachtet. Da aber der Abstand der positiven Säule von der Kathode mit der Rohrweite wächst, so treten in weiten Rohren nur bei entsprechend großem Abstand der Elektroden Schichten auf. So waren in dem Rohr von 300 mm Durchmesser trotz eines Elektrodenabstandes von 1,8 m nur drei Schichten von 21 cm Abstand zu erzielen, während bei geringerem Elektrodenabstand in der Regel über-

haupt kein positives Lichtgebilde auftrat. Folgende Angaben wurden an diesem Rohr bei einem Druck von 0,0292 mm erhalten:

Strom	1,8	3	5	10 Milliamp.
Schichtzahl . . .	3	2	1	keine
Schichtabstand . .	21	22	—	— cm
Scheitelabstand . .	147	159	172	183 cm

Um an dem Rohr von 300 mm Durchmesser brauchbare Werte durch Messen einer größeren Anzahl von Schichten zu erhalten, wäre ein Elektrodenabstand von etwa $3^1/_2$ m Länge erforderlich gewesen. Da die hier erforderlichen Drucke bei der zu Gebote stehenden Stromquelle weit unter 0,1 mm liegen, also bei der Schwierigkeit des Evakuierens eines nahezu 300 Liter fassenden Raumes nur ein sehr kleiner Druckbereich untersucht werden könnte, so wurde von einer weiteren Verwendung dieses Rohres abgesehen, zumal auch bei dem Rohr von 200 mm Durchmesser gegenüber dem von 10 mm keine neuartigen Erscheinungen zu beobachten waren. Es mag die Tatsache genügen, daß bei der ungewöhnlich großen Rohrweite gleichfalls Schichtung erhalten wurde.

Der Druckbereich, in dem Schichtung stattfindet, ist in verschiedenen Gasen verschieden groß. Die Gase wurden daraufhin in einem Rohr von 32 mm Durchmesser geprüft. Der Eintritt der Schichtung ist nicht scharf definiert. Nur bei hohen Drucken setzt bei Steigerung der Stromstärke die Schichtung plötzlich ein. Dieser Eintritt ist aber mehr durch die Stromstärke als durch den Druck bestimmt. Bei niederen Drucken geht der geschichtete Zustand mit abnehmendem Druck stetig in den ungeschichteten über, so daß sich über den Eintritt der Schichtung und ihr Verschwinden nur oberflächliche Angaben machen lassen.

Folgende Zahlen geben die Druckbereiche an, in denen in dem verwendeten Rohr bei Stromstärken von 5—60 Milliamp. deutlich meßbare Schichtung auftrat.

CO_2	0,374	bis	0,116	mm Hg
N_2	0,435	„	0,012	„
H_2	2	„	0,02	„

Mit Sauerstoff wurde in dem Rohr von 32 mm keine deutliche Schichtung erzielt. Dagegen fand bei Sauerstoff in einem Rohr von 80 mm Durchmesser zwischen den Drucken 0,09 und 0,01 teilweise meßbare Schichtung statt. Jedoch ist es trotzdem nicht ausgeschlossen, daß in reinem Sauerstoff überhaupt keine Schichten auftreten. Bei so niedrigen Drucken wird jedenfalls der Partialdruck, der von den Fettdichtungen herrührenden Kohlenwasserstoffe mit dem des Sauerstoffs vergleichbar, und so rührt vielleicht die hier im Sauerstoff beobachtete Schichtung in Wirklichkeit von den Kohlenwasserstoffen her.

Die Druckbereiche, bei denen Schichtung stattfindet, liegen bei um so niedrigeren Drucken, je größer der Rohrquerschnitt ist, wie ja überhaupt allgemein die Vergrößerung des Rohrquerschnittes eine Erniedrigung des Druckes erfordert, wenn ähnliche Erscheinungen auftreten sollen.

Bei hohen Drucken und geringer Stromstärke haben die Schichten die Form eines einfachen Kegels, dessen Spitze der Kathode zugekehrt ist. Mit abnehmendem Druck oder auch bei zunehmender Stromstärke werden sie immer flacher, bis sie schließlich die Form ebener Scheiben annehmen.

Unter bestimmten Verhältnissen waren in Wasserstoff die bekannten „Doppelschichten“ zu beobachten, die dann meist bei abnehmendem Druck oder steigender Stromstärke plötzlich in „Schichtpaare“ übergingen. Unter Doppelschicht ist ein Gebilde zu verstehen, welches sich von der gewöhnlichen Schicht dadurch unterscheidet, daß der Scheitel der Schicht, d. h. der der Kathode zugekehrte Teil, in zwei verschieden, gewöhnlich blau und rot, gefärbte, scharf abgegrenzte Zonen zerfällt. Eine davon wesentlich verschiedene Erscheinung ist das Auftreten von Schichtpaaren. Es zerfällt dabei die positive Säule in Paare von Schichten mit verschiedenem Abstand, so daß größere und kleinere Schichtabstände bestehen, die meist je unter sich gleich miteinander abwechseln. Dieser Zerfall der positiven Säule in Schichtpaare ist nicht nur graduell von den Doppelschichten verschieden. Das geht erstlich daraus hervor, daß beide Zustände nicht stetig ineinander übergehen. Zweitens haben, wie sich aus späteren Messungen ergab, die Mittelwerte aus den Doppelschichten (die Doppelschicht als eine Schicht gerechnet) für die Beziehungen zwischen Druck,

Strom und Schichtabstand dieselbe Bedeutung wie die Mittelwerte aus den Schichtpaaren (ein Schichtpaar als zwei Schichten gerechnet).

Die Schichten sind auf der Kathodenseite der Schicht am deutlichsten begrenzt und zwar am besten in Wasserstoff und Kohlenwasserstoffen, während die anderen Gase meist nur wolkige Gebilde geben.

Infolge von Beobachtungen an der Schichtenbildung läßt sich die Vermutung aussprechen, daß bei Gasgemischen der Wasserstoff in erster Linie zum Träger der Entladung wird, d. h. sich in höherem Grade an der Entladung beteiligt, als es seinem Partialdruck entsprechen würde. Läßt man nämlich zu Stickstoff eine Spur Wasserstoff hinzutreten, so nimmt die Entladung, vornehmlich die Schichtung, sehr bald die charakteristische Form der Entladung in Wasserstoff an, während umgekehrt eine bedeutend größere Menge Stickstoff zu Wasserstoff hinzutreten muß, ehe sich dessen Einfluß bemerkbar macht. Es ist daher wahrscheinlich, daß in Wasserstoff Verunreinigungen von Stickstoff, Sauerstoff oder Kohlensäure ganz geringe Störungen verursachen, während umgekehrt in diesen Gasen schon Spuren von Wasserstoff die Vorgänge wesentlich verändern.

Der Schichtabstand ist in der Hauptsache abhängig von Stromstärke, Druck, Rohrdurchmesser und Natur des Gases. Diese Abhängigkeiten wurden durch Konstanthalten je dreier der vier Parameter untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in den folgenden Abschnitten behandelt. — Wir wollen hier zunächst noch folgende, wenn auch sehr geringe Änderung des Schichtabstandes erwähnen:

Im allgemeinen zerfällt die positive Säule bekanntlich in Schichten von gleichen Abständen, abgesehen von der meist größeren ersten Schicht. Genauere Messung zeigt jedoch noch eine geringe Änderung des Schichtabstandes längs der positiven Säule. Und zwar nehmen die Schichtabstände vom Scheitel der Säule nach der Anode hin bei höheren Drucken etwas zu, bei niederen Drucken ab. Diese Änderung beträgt bei 40 Schichten zwischen den ersten und letzten der Reihe höchstens 2 Proz., wurde aber bei drei verschiedenen Rohrweiten deutlich beobachtet. Der hieraus für die Messung etwa

entstehende Fehler ist zu vernachlässigen, da ja der Mittelwert aus der ganzen Schichtreihe genommen wurde.

3. Schichtabstand und Stromstärke.

Über die Abhängigkeit der Schichtabstände von der Stromstärke bei konstanten Drucken wurden für Kohlensäure, Stickstoff und Wasserstoff folgende Diagramme erhalten, bei denen die Abszissen die Schichtabstände, die Ordinaten die Stromstärken angeben. Die den Kurven beigefügten Zahlen bedeuten die Drucke in mm Hg (vgl. Tab. II p. 20 bis 23 und Kurventafel II p. 24).

Die Diagramme *c, e, f*, Taf. II zeigen die Schichtung in verschiedenen Gasen bei gleichem Rohrquerschnitt, die Diagramme *a*, *b*, *c*, *d* dagegen die Schichtung in einem Gas (Wasserstoff) bei verschiedenen Querschnitten. Es ist aus den Kurven zu ersehen, daß sich die Schichtabstände mit wachsendem Strom einer konstanten Länge nähern[1]), die dann bei gegebener Rohrweite nur noch vom Druck abhängig ist. — In den Diagrammen für Wasserstoff (*a* bis *d*) scheinen die Kurven für höhere Drucke dem zu widersprechen. Indes ist zu vermuten und später auch beobachtet worden, daß bei genügend hoher Stromstärke auch sie schließlich der Ordinate (Stromstärke) parallel werden.

Hierzu ist jedoch noch zu bemerken: Für höhere Drucke werden die Schichtabstände nur bei äußerst großer Stromstärke konstant. Diese große Stromstärke (sie beträgt für ein Rohr von 80 mm Durchmesser bei 1 mm Druck nahezu 200 Milliamp.) bewirkt aber eine bedeutende Steigerung der Temperatur im gesamten Entladungsrohr, auch im positiven Teil der Entladung. Diese Temperatursteigerung bewirkt teils eine Verlängerung, teils auch ein Verwaschenwerden der Schichten. Dabei verlängern sich mit weiter wachsendem Strom die Schichtabstände jedoch nicht stetig, vielmehr findet eine meist sprungweise Änderung statt, wobei oft längere und kürzere Schichten nebeneinander bestehen, aber nicht regelmäßig abwechselnd wie bei dem Auftreten von Schichtpaaren. — Es treten also ganz ungeordnete Verhältnisse ein. Demnach gilt

1) E. Riecke, Ann. d. Phys. **16**. p. 294 u. 303. 1905.

Tabelle II. Vgl. Kurventafel II.

(Stromstärke–Schichtabstand.)

p = Druck in mm Hg; i = Stromstärke in M.-A.; l = Schichtabstand in mm.

a			*b*		
H_2 : 20 mm			H_2 : 32,4 mm		
p	i	l	p	i	l
1,032	4	20,7	0,855	5	31,8
	6	19,7		10	29,6
	10	18,2		20	23,6
	15	14,8		30	18,6
	20	12,5	0,633	5	29,7
	30	9,5		10	27
0,765	6	17,4		15	22,7
	10	12		20	17,7
	20	10,6		30	13,5
	30	10,8	0,429	5,7	24,5
0,522	3,5	12,2		8	17,6
	6	11,5		15	15,7
	10	11,5		25	14,6
	20	11,9		35	14,6
	30	12	0,282	5,6	18,54
0,376	4	13,8		8	18,52
	7	13,9		15	18,5
	12	14,1		25	18,3
	20	14,5		35	18,3
	30	15	0,238	6	20,5
0,208	4	19,7		8	20,45
	8	20,1		12	20,3
	15	20,4		20	20,3
	25	20,8		34	20,2
	35	21,2	0,208	5,7	22,4
0,156	2,5	23,1		15	22,7
	10	24,1		30	22,65
	25	24,6	0,147	4,9	28,5
	35	25,1		10	28,9
0,107	1	28,7		20	29,1
	5	30,1		30	29,2
	15	30,6			
	25	31			

Tabelle II. Vgl. Kurventafel II.

(Stromstärke–Schichtabstand.)

p = Druck in mm Hg; i = Stromstärke in M.-A.; l = Schichtabstand in mm.

c

H_2 : 40 mm

p	i	l	p	i	l
0,723	20,5	56,8	0,242	5,2	24,3
	25	51,5		6	24
	30	44,7		8	23,7
	35	40,4		10	23,6
				15	23,5
0,564	16	42,2		20	23,6
	18	39,7		25	23,5
	20	36,4		30	23,4
	23	31,8			
	26	30,4	0,154	5	31,5
	30	27,5		8	31,9
	35	25,3		15	32,25
				20	32,3
0,435	6	44,9		25	32,5
	8	39,3		30	32,4
	10	33,8			
	12	30	0,122	3,5	36,5
	15	25,4		10	37,1
	17	23,75		15	37,3
	20	21,8		20	37,4
	25	19,9		31	37,4
	30	19,4			
	35	19,1	0,107	3,5	40,9
				10	41,1
0,33	5	45,2		20	41,4
	6	41,6		30	41
	7	34			
	8	30,7	0,08	5	47,9
	9	26,5		10	48,3
	10	23,6		15	48,8
	11	22,6		25	49
	12	22,5			
	15	21,9	0,06	5	53
	20	21,2		10	53,7
	25	21,1		15	53,7
	30	20,7		25	54
0,272	4	34,4	0,046	3	61,5
	5	24,7		10	62,7
	6	23,7		25	62,9
	7	23,12			
	8	22,1			
	10	22,05			
	15	22,08			
	20	21,6			
	25	21,6			
	30	21,5			

Tabelle II. Vgl. Kurventafel II.

(Stromstärke–Schichtabstand.)

p = Druck in mm Hg; i = Stromstärke in M.-A.; l = Schichtabstand in mm.

d			e		
H_2 : 100 mm			CO_2 : 40 mm		
p	i	l	p	i	l
0,322	30	88,3	I.	6,2	46,1
	40	74		10	49,8
	60	60	0,165	15	52,5
				20	54,2
	29	83		30	55,6
0,262	40	72		35	56,3
	50	60			
	60	57	II.	4	55,4
				8	58,8
	27	66	0,132	15	61,9
0,21	35	56		20	63,2
	50	54		30	65,2
	60	53,6		35	65,2
	20	61	III.	4,3	59,4
0,161	30	58	0,107	8	62,8
	40	57		15	66,6
	60	54,4		25	68,1
	20	64	IV.	5	62,8
0,102	30	62	0,087	10	66,7
	45	61,6		20	69,8
	60	62		35	71,8
	16	68	V.	4,3	61,9
0,084	25	70	0,0695	10	67,8
	40	66		20	70,5
	60	65		35	72,8
	10	82,5	VI.	5,5	60,5
0,0508	20	84,5	0,0516	10	64,4
	45	84		20	67,6
	60	83		35	70,8
	11	104,6	VII.	10	61,5
0,0328	20	104	0,0428	20	65,3
	35	102		30	68,2
	50	102			
	8	122			
0,0214	20	122,5			
	35	122			
	50	120			

Tabelle II. Vgl. Kurventafel II.

(Stromstärke–Schichtabstand.)

p = Druck in mm Hg; i = Stromstärke in M.-A.; l = Schichtabstand in mm.

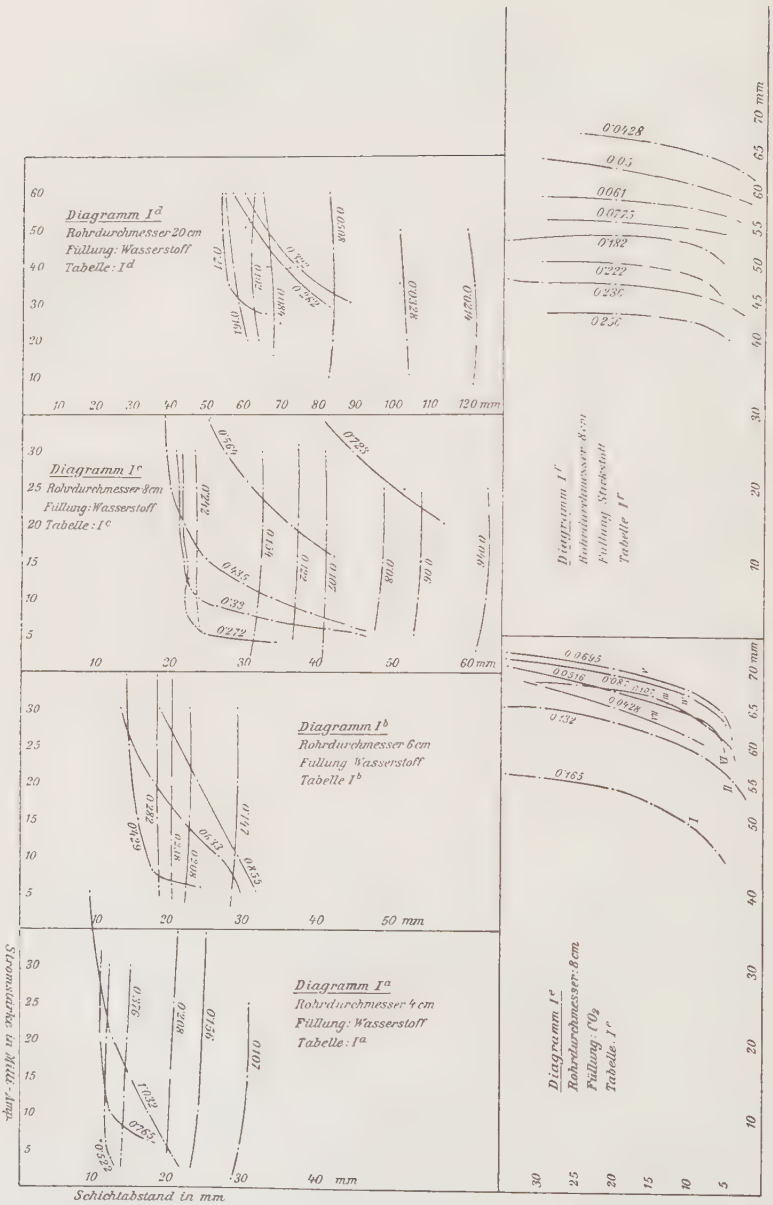
f

N_2 : 40 mm

p	i	l	p	i	l
0,256	5	40	0,0775	5	54,9
	8	42,2		10	54,8
	10	42,7		20	55,95
	15	43,3		30	56,4
	20	43,5			
	30	43,8	0,061	5	56,3
0,236	5,3	44,6		10	57,7
	8	45,9		20	58,9
	10	46,6		30	59,5
	20	47,5	0,05	4,4	59,1
	30	47,6		10	60,8
	35	48,5		20	63,4
0,222	5,9	45,8		30	64,5
	8	48	0,0428	3,2	62,5
	12	49,7		8	64,8
	16	49,8		15	66,4
	20	50,7		25	68
	30	50,6			
0,182	5,3	49,8			
	8	52,1			
	12	53,5			
	20	54,2			
	35	53,5			

das Gesetz vom Konstantwerden der Schichtabstände mit wachsendem Strom nur so lange, als die Temperatur des Entladungsrohres im Bereich des positiven Glimmlichts nicht zu hoch ist. Die Temperatur der Außenwand des Gefäßes darf etwa 100° nicht weit übersteigen.

Wir müssen also das Gesetz über die Abhängigkeit der Schichtabstände von der Stromstärke in folgender Weise aussprechen: Bei konstantem Druck nähert sich der Schichtabstand mit wachsendem Strom einem konstanten Wert und zwar für Wasserstoff abnehmend bei hohen Drucken, wenig zunehmend bei niederen Drucken, für Stickstoff und Kohlensäure bei allen Drucken, bei denen Schichtung erhalten wurde,



Kurventafel II.

etwas zunehmend. Übersteigt die Stromstärke ein bestimmtes Maß, so werden die Schichtabstände wieder größer; jedoch ist dies nicht ein direkter Einfluß der Steigerung der Stromstärke, sondern die dabei auftretende Temperatursteigerung vergrößert den Schichtabstand wieder.

4. Schichtabstand und Druck.

In dem Konstantwerden der Schichtabstände bei genügend hoher Stromstärke ist die Möglichkeit gegeben, einen Einfluß der Druckänderung auf den Schichtabstand zu untersuchen.

Schon aus den Diagrammen I, Taf. II ist zu ersehen, daß die konstanten Schichtabstände mit abnehmendem Druck wachsen. Dabei macht jedoch die Kohlensäure eine Ausnahme, denn für diese besitzt die Funktion, Schichtabstand-Druck ein Maximum, so daß für CO_2 das Goldsteinsche Gesetz nicht gilt. Ob sich alle zusammengesetzten Gase von den einfachen durch dieses Maximum unterscheiden, ist schwer festzustellen, da die Zahl scharf definierter zusammengesetzter Gase, die zur Entladung verwendbar sind, so gering ist, und auch nicht immer Schichtung erhalten werden kann. Trotz wiederholter Versuche mit N_2O war es nicht möglich, eine auch nur angedeutete Schichtung zu erhalten. (In diesem Gas war das sogenannte Nachleuchten besonders schön zu beobachten.)

Die Entladung in Wasserstoff hat folgende Vorzüge: bei ihm stören fremde Beimengungen weniger als in anderen Gasen, die Schichtung erstreckt sich über einen großen Druckbereich, die Schichtköpfe sind scharf begrenzt. Es wurden daher die weiteren Untersuchungen über die Schichtung auf Wasserstoff beschränkt. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der konstanten Schichtabstände vom Druck wurden die Schichtabstände für zwei bis drei höhere Stromstärken gemessen und deren Wert, wenn er konstant blieb, dem betreffenden Druck zugeordnet.

Die Druckbereiche, bei denen die Schichtabstände zur Konstanz gebracht werden können, erleiden insofern eine Beschränkung, als die dazu erforderlichen Stromstärken um so höher sind, je größer der Rohrradius ist. Folgende Zahlen geben annähernd die Stromstärken an, bei denen in den einzelnen Rohren bei 1 mm Druck die Schichtabstände konstant sind.

Rohrradius	Stromstärke
5,2 mm	15 Milliamp.
9,35 „	30 „
16 „	60 „
32,2 „	100 „
39,8 „	180 „

Für das Rohr von 100 mm Radius würden also schätzungsweise 400 Milliamp. erforderlich sein.

Da diese Stromstärken offenbar nicht mit dem Quadrat der Radien zunehmen, so läßt sich daraus ersehen, daß die gleiche Stromdichte in den verschiedenen Rohren bei gleichem Druck nicht den gleichen Zustand hervorruft. Vielmehr legen obige Zahlenangaben die Vermutung nahe, daß in Rohren von verschiedener Weite bei gleichen Drucken dann ähnliche Zustände herrschen, wenn die Stromstärken sich verhalten wie die Radien, wenn also nicht i/r^2, sondern i/r annähernd konstant ist. Es ist darum nicht vorteilhaft, bei Rohren von verschiedener Weite für Vergleichungen die Strom*dichte* heranzuziehen.

Für Zylinderrohre von verschiedenen Durchmessern wurden folgende Kurven (p. 29) erhalten, wo die konstanten Schichtabstände (l) in mm als Ordinaten, die Drucke (p) in mm Hg als Abszissen aufgetragen sind. Die den Kurven beigefügten Zahlen geben die Rohrradien in mm an.

Logarithmisch aufgetragen[1]) gehen diese Kurven in Gerade über, die einander parallel laufen mit einer Neigung gegen die Abszisse ($\lg p$), deren Tangente $-0{,}53$ beträgt. Daraus ergibt sich die Gleichung:

$$\lg l = C - 0{,}53 \lg p.$$

Die Konstante C ist vom Rohrradius abhängig, wir setzen daher $C = \lg f(r)$. Dann ergibt sich das Goldsteinsche Gesetz in der einleitend angegebenen Form:

$$l = \frac{f(r)}{p^{0{,}53}}.$$

Der Exponent m des Goldsteinschen Gesetzes hat also für Wasserstoff den Wert **0,53.**

1) $\log p$ als Abszisse und $\log l$ als Ordinate.

Tabelle III. (Vgl. Kurventafel III).

(Druck-konstanter Schichtabstand.)

p = Druck in mm Hg; l = Schichtabstand in mm.

Vgl. Kurventafel III.

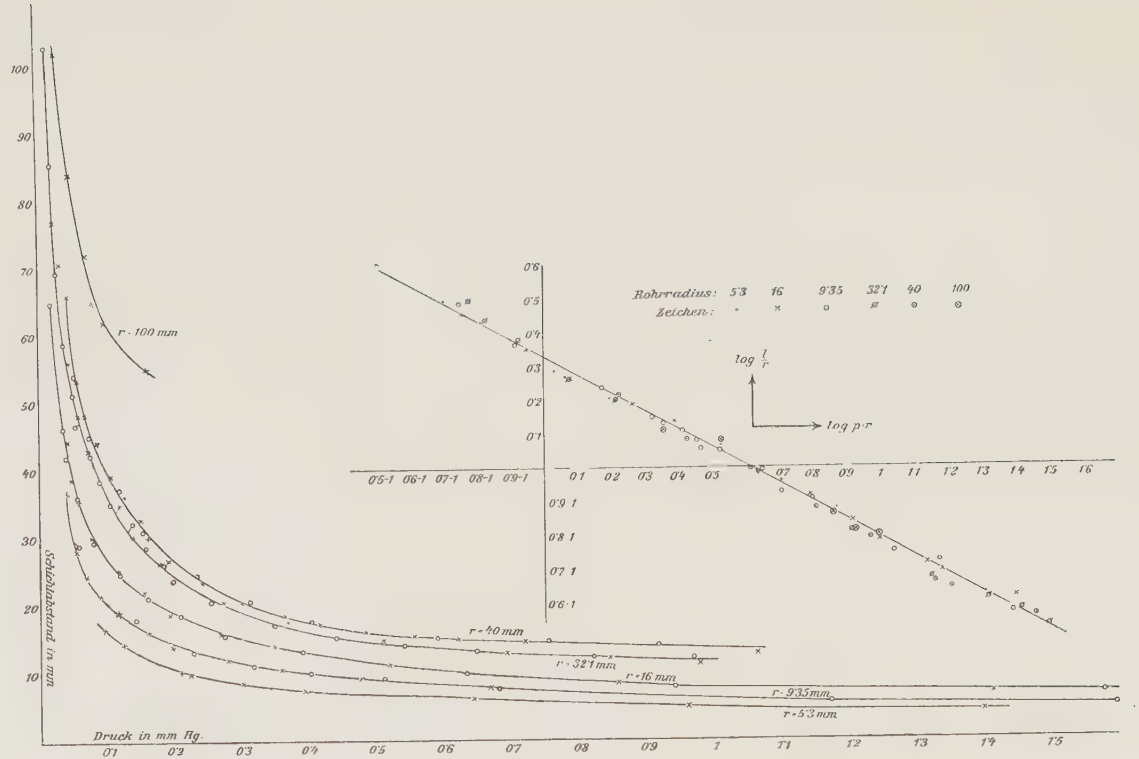
Füllung: H_2

p	l	p	l
Rohrradius 5,3 mm		Rohrradius 16 mm	
1,4	4	1,58	6,62
0,96	4,8	0,942	7,85
0,642	6,07	0,633	9,7
0,391	7,4	0,39	13,18
0,3	8,5	0,272	15,65
0,222	9,9	0,207	18,7
0,206	10,3	0,16	21,1
0,124	14,4	0,117	24,8
0,096	16,5	0,08	29,5
		0,056	36
Rohrradius 9,35 mm		0,0408	42,1
		0,0357	46,2
0,68	7,5	0,02	65
0,508	8,87	2	6
0,4	10,05	1,416	6,63
0,316	11,1	0,858	8,3
0,226	13,15	0,518	11,13
0,142	18	0,346	13,9
0,06	29	0,266	15,7
0,669	7,7	0,192	18,62
0,474	9,17	0,154	22,13
0,358	10,5	0,115	25,3
0,276	11,9	0,0776	30,1
0,196	13,84	0,0596	35,3
0,161	16,2	0,048	38,8
0,118	19	0,0426	44,5
0,0884	21,44		
0,0696	24,5		
0,0556	28		
0,0404	36,7		
1,176	5,3		
1,6	50		

Tabelle III (Fortsetzung).

Füllung: H_2

p	l	p	l
Rohrradius 32,1 mm		Rohrradius 40 mm	
0,972	12,15	0,918	14
0,822	12,25	0,753	14,6
0,648	13,1	0,588	15
0,54	13,84	0,403	17,5
0,438	15,05	0,312	20,7
0,346	17,35	0,232	24,5
0,256	20,6	0,152	31
0,198	23,6	0,119	37,3
0,183	26,2	0,074	45
0,158	28,7	0,0536	54
0,138	31,3	1,068	12,5
0,106	35	0,72	14,5
0,09	38,5	0,621	14,85
0,076	42,4	0,555	15,3
0,054	46,8	0,483	16
0,0516	51,1	0,414	17,2
0,0375	58,7	0,363	18,45
0,0282	69,5	0,298	20,5
0,0212	88	0,24	23,4
0,0188	102,8	0,194	26,8
0,978	11	0,16	30
0,846	12,5	0,154	32,7
0,639	12,75	0,125	36,3
0,51	14,5	0,105	39,4
0,366	17,7	0,087	44
0,27	20,5	0,0676	48,2
0,18	26,2	0,0556	53,5
0,138	30,25	0,0428	66
0,119	35		
0,072	43	Rohrradius 100 mm	
0,0592	48,4	0,16	55
0,0452	56	0,102	62
0,0333	70,8	0,084	65
0,0264	77	0,073	72
		0,0508	84
		0,034	102
		0,023	130



Kurventafel III. (Druck—konstanter Schichtabstand.)

5. Schichtabstand und Rohrradius.[1])

Aus der Taf. III ist gleichzeitig ein Einfluß des Rohrdurchmessers auf den Schichtabstand zu beobachten; aber es sind die Schichtabstände bei sonst gleichen Verhältnissen nicht den Radien direkt, auch nicht den Quadraten der Radien, also dem Rohrquerschnitt, proportional.

Zu einer Vorstellung von einem Einfluß der Rohrweite kann man durch folgende Überlegung, die ich Hrn. Dr. Jaffé verdanke, gelangen: Die Zustände im Rohr erfahren durch Steigerung der Stromstärke keine Änderung mehr. Es wird daher alles jedenfalls nur noch durch die mittlere freie Weglänge der Moleküle bedingt sein. Wir betrachten nun einen aus einem Rohr ausgeschnitten gedachten Zylinder mit den darin in Bewegung befindlichen Molekülen. Lassen wir diesen Zylinder dann wachsen, so daß er sich stets ähnlich bleibt, so wird sich das Bild des Zylinders samt den darin bewegten Molekülen dann ähnlich vergrößern, wenn die mittlere freie Weglänge der Moleküle den linearen Dimensionen des Zylinders stets proportional, der Gasdruck also dem Radius des Zylinders umgekehrt proportional ist. Bei Zylindern von verschiedener Weite wird demnach alles in linearen Verhältnissen ähnlich verlaufen, wenn das Produkt $p \,.\, r$ dasselbe ist. Es müßte dann auch die Schichtenbildung in den verschiedenen Rohren ähnlich verlaufen, der Schichtabstand den Rohrradien also direkt proportional sein.

Die Kurven der Tafel III wurden daher einer entsprechenden Transformation unterworfen, indem als Abszissen $p \,.\, r$ und als Ordinaten l/r aufgetragen wurden. Dadurch wurde erreicht, daß die Punkte aller Kurven in eine Kurve fallen, die logarithmisch wieder in eine Gerade mit der Neigungstangente $-0{,}53$ übergeht. Vgl. Taf. III. Diese Gerade schneidet die Ordinate im Abstande 0,33. Daraus ergibt sich die Funktion

$$\log \frac{l}{r} = 0{,}33 - 0{,}53 \log p \,.\, r\,,$$

$$\frac{l}{r} = \frac{2{,}14}{(p \,.\, r)^{0{,}53}}\,.$$

1) M. Toepler, Isis 1. p. 17ff. 1898; E. Goldstein, Wied. Ann. 15. p. 278. 1882; E. Gehrcke, Wied. Ann. 15. p. 510. 1904.

Wir erhalten also durch Berücksichtigung der Rohrweite folgende Erweiterung des Goldsteinschen Gesetzes:

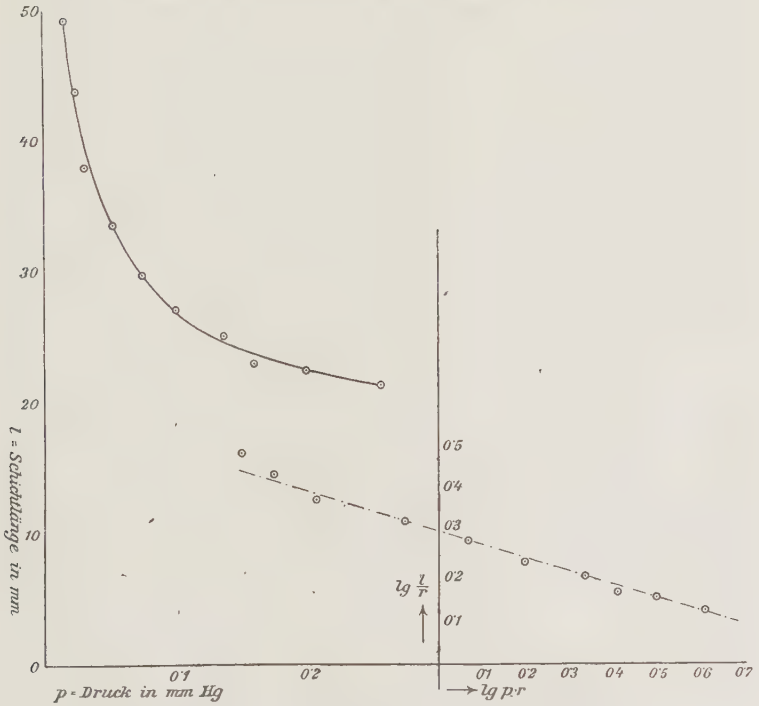
$$l = c \frac{r^{1-m}}{p^m}.$$

Für Wasserstoff ist $c = 2{,}14$ und $m = 0{,}53$.

Tabelle IIIa.

Vgl. Kurventafel IIIa.

Füllung N_2; Rohrradius 32,1 mm.			
p	l	p	l
0,256	21,3	0,0735	29,7
0,2	22,5	0,0524	33,9
0,16	23	0,0329	38
0,138	25,2	0,0264	44
0,099	27	0,0176	49,53



Kurventafel IIIa. (Druck—konstante Schichtlänge.)

Um zu untersuchen, ob diese Funktion auch für andere Gase gilt, wurden Messungen der Schichtabstände in Stickstoff vorgenommen und für ein Rohr von 32,1 mm Radius folgende Kurve erhalten, die durch die Transformation ($\log p \,.\, r - \log l/r$) gleichfalls in eine Gerade übergeht (vgl. Tab. III a und Kurventafel III a p. 31).

Der Exponent m ist jedoch hier ein wesentlich anderer, er hat etwa den Wert **0,32,** während die Konstante $c = 2$ wird, sich also innerhalb der Genauigkeitsgrenze der Versuche nicht von der Konstanten c für H unterscheidet. Diese Messung in Stickstoff kann keinen Anspruch auf Genauigkeit machen, da zur Entfernung der Verunreinigungen, besonders der im Stickstoff in hohem Grade störenden Kohlenwasserstoffe, keine Vorkehrungen getroffen wurden. Sie soll auch nur zeigen, daß der Exponent m von der Natur des Gases abhängig ist. Bemerkenswert ist jedoch, daß die Konstante c trotz so großer Verschiedenheit der Exponenten m (0,53 und 0,32) hier nahezu denselben Wert hat wie bei Wasserstoff, also vielleicht allen Gasen gemeinsam ist.

Ergebnisse.

1. Mit wachsendem *Strom* nähern sich die Schichtabstände bei konstantem Druck je einer konstanten Länge.[1])

2. Diese konstanten Längen sind vom *Druck* abhängig nach der Goldsteinschen Beziehung, die wir in der Form schreiben:

$$l = \frac{f(r)}{p^m}.$$

Anmerkung: Für die Kohlensäure gilt das Goldsteinsche Gesetz nicht.

3. Wenn sich die Drucke umgekehrt verhalten wie die *Rohrradien*, so sind die konstanten Schichtabstände den Rohrradien direkt proportional. Die Beziehung zwischen Schichtabstand (l), Druck (p) und Rohrradius (r) läßt sich darstellen durch das Goldsteinsche Gesetz in folgender Erweiterung:

$$l = c \frac{r^{1-m}}{p^m}.$$

1) E. Riecke, Ann. d. Phys. **16.** p. 294 u. 303. 1905.

m ist für Wasserstoff = 0,53 (für Stickstoff = 0,32). c ist für Wasserstoff = 2,14 (für Stickstoff = 2).

Der Exponent m ist von der Natur des Gases abhängig. Die Konstante c wurde für Wasserstoff und Stickstoff nahezu übereinstimmend gefunden.

II. Die Schichtpotentialdifferenz.

Während der Potentialfall längs der Rohrachse in einer ungeschichteten Lichtsäule konstant ist, bewegt er sich längs der geschichteten Säule gleichsam auf einer Wellenlinie, so daß er in den hellen Teilen der Schichten Maxima besitzt.[1] [2] Die Art der Verteilung des Potentialfalles ist dann nur von der Lage der Schichten abhängig. Die Größe des Potentialfalles, die nach A. Herz[3] für die ungeschichtete Säule von Druck, Stromstärke und Rohrweite beeinflußt wird, wird aber auch bei Schichtung der Säule von diesen drei Faktoren in ähnlicher Weise abhängig sein. Jedoch wird diese Abhängigkeit erst dadurch von Interesse, daß sie in Beziehung zum Schichtabstand gebracht wird, indem also nicht der absolute Potentialfall, sondern die auf eine Schicht entfallende Potentialdifferenz gemessen wird, da diese Schichtpotentialdifferenz jedenfalls im Zusammenhang steht mit der Ionisierungsspannung eines Elektrons. Die Schichtpotentialdifferenz bleibt nach den Kurven von Wilson[4] unter gleichen Verhältnissen für jede Schicht der Säule ziemlich dieselbe und beträgt dort etwa 30 Volt. Nach P. B. Pentscheff[5] sinkt sie in reinen Gasen nicht unter 20 Volt, in unreinem Wasserstoff variiert sie zwischen 13 und 45 Volt. R. Holm[6] findet ein Sinken der Schichtpotentialdifferenzen mit wachsendem Strom auf Minimalwerte, die gleichfalls nahe bei 13 Volt liegen.

Im folgenden werden Untersuchungen über die Beziehungen zwischen Stromstärke und Schichtpotentialdifferenz behandelt.

1) Graham, Wied. Ann. **64.** p. 49. 1898.
2) H. A. Wilson, Phil. Mag. **49.** p. 505. 1900.
3) A. Herz, Wied. Ann. **54.** p. 244. 1895.
4) H. A. Wilson, l. c.
5) P. B. Pentscheff, Physik. Zeitschr. 1906. p. 463.
6) R. Holm, Physik. Zeitschr. 1908. p. 558.

1. Versuchsanordnung.

a) Die Art der Sonden.

Temperatursteigerung im gesamten Entladungsrohr hat eine Abnahme des Potentialgradienten zur Folge. Daher müssen die Messungen möglichst schnell vorgenommen werden, um die Störungen zu vermeiden, die von der bei längerem Entladungsdurchgang im Rohr entwickelten Wärme herrühren. Die Schnelligkeit der Messung ist also in erster Linie bestimmend für die Wahl einer Meßmethode.

Zunächst kann man bei Verwendung beweglicher Sonden oder Elektroden durch Verschieben der ganzen Entladung an den Sonden vorbei, oder umgekehrt, die Potentiale von Schichtkopf zu Schichtkopf messen. Verschiebbare Sonden erfordern meist eine Vorrichtung im Rohrinnern, die durch Vermehrung der das positive Licht begrenzenden Flächen (Glasrohre) eine Änderung des Entladungsverlaufes verursachen kann. Bei verschiebbaren Elektroden mit festen Sonden müssen infolge der verschiedenen Schichtabstände unter verschiedenen Verhältnissen die Potentialdifferenzen zwischen Schichtkopf und Anode für je zwei Schichten gemessen und aus deren Differenz die Schichtpotentialdifferenzen berechnet werden. Für einen Wert sind also zwei Messungen nötig. Damit der Anodenfall bei beiden Messungen konstant bleibt, muß die Anode ihre relative Lage zu dem ihr nächstliegenden Schichtkopf beibehalten. Es müssen also beide Elektroden verschoben werden, damit ihr Abstand ungeändert bleibt.

Während der Zeit, welche nach dieser Methode eine Messung infolge des Einstellens auf einen Schichtkopf erfordert, steigert sich auch bei weniger hohen Stromstärken die Temperatur an der Kathode und bewirkt ein Zurückweichen der positiven Säule, so daß sich auch die relative Lage der Sonden zum Schichtkopf etwas ändert. Da an den Schichtköpfen der Potentialgradient ein Maximum besitzt, so können auf diese Weise erhebliche Fehler in den Resultaten entstehen. Hauptsächlich werden aber bei höheren Stromstärken durch die während der Messung erfolgende Temperatursteigerung in der positiven Säule nicht unbedeutende Fehler verursacht.

Eine zweite Methode zur Bestimmung der Schichtpotentialdifferenzen besteht darin, daß man unter der Voraussetzung, daß alle Schichten der Säule unter gleichen Verhältnissen gleiche Potentialdifferenzen besitzen, bei feststehenden Elektroden mittels zweier feststehenden Sonden in möglichst großem Abstand den Spannungsabfall zwischen zwei Rohrquerschnitten mißt und dann aus dem gleichzeitig bestimmten Schichtabstand die auf eine Schicht entfallende Potentialdifferenz berechnet. Diese Methode berücksichtigt zwar die Änderung des Potentialgradienten längs einer Schicht nicht, denn es befinden sich dabei die Sonden nicht immer in derselben Zone einer Schicht, aber der daraus entstehende Fehler kann durch Beobachtung einer hinreichend großen Zahl von Schichten beliebig herabgesetzt werden.

Die Schwankung des Potentialgradienten längs der positiven Säule beträgt 10—15 Proz. Bei einer Berücksichtigung von 10 Schichten kann also im ungünstigsten Falle nur noch ein Fehler von 1—$1^1/_2$ Proz. entstehen. Es wurden gewöhnlich mehr als 10 Schichten bei den Messungen zwischen die Sonden genommen. Dadurch wurde gleichzeitig ein Fehler verringert, der insofern entstehen kann, als durch eine Sonde die Stellung der benachbarten Schicht zuweilen etwas beeinflußt wird. Diese Art der Bestimmung der Schichtpotentialdifferenzen erscheint daher vorteilhafter.

Der Potentialfall besteht nicht nur längs der Rohrachse, sondern auch senkrecht dazu nach der Rohrwand hin. Die Sonden müssen daher so angebracht sein, daß diese Änderung des Potentials senkrecht zur Rohrachse die Resultate nicht beeinflußt. Das kann in der Weise geschehen, daß die Sonden von der Rohrwand aus je eine gleiche Strecke weit ins Rohrinnere ragen oder in der Rohrachse angebracht sind mit isolierter Zuführung. Im ersten Fall können die Resultate ungenau werden durch die Verschiedenheit der Aufladung der Rohrwand, die durch äußere Kapazitätsverhältnisse veranlaßt werden kann. Zweitens fällt die Achse der Entladung nicht immer mit der Rohrachse zusammen, was bei der Gegenwart von Sonden häufiger der Fall ist, so daß auch bei zentralen Sonden der Spannungsabfall quer zur Rohrachse bei der Messung mit zur Geltung kommen kann. Die unter diesen Um-

ständen möglichen Fehler werden jedenfalls geringer, wenn man die Sonden quer durchs Rohr führt und dadurch den Mittelwert der Potentiale längs des Rohrdurchmessers zu messen bekommt. Die Verwendung solcher das Rohr durchsetzenden Sonden hat gegenüber den zentralen Sonden ferner den Vorteil, daß dadurch das Vorhandensein eines dielektrischen Körpers (Sondenisolation) in der Entladungsbahn vermieden wird; denn Dielektrika haben in der Entladungsbahn die Wirkung, daß sie nach der Anode hin die Schichtung stören. Glasröhrchen werfen z. B. noch bis zur dritten benachbarten Schicht hin breite Schatten auf die Schichtköpfe und deformieren die Schichten zuweilen sehr stark. Als Sonden wurden daher quer durchs Rohr gespannte Drähte verwendet.

Wie schon oben erwähnt, üben die Sonden in manchen Fällen einen Einfluß auf die Stellung der ihnen nächstliegenden Schichten aus, indem sie die Schichten gleichsam anziehen und so den Schichtabstand oft nicht unbeträchtlich ändern. Dieser Einfluß scheint auch von dem Metall abhängig zu sein, aus dem die Sonden bestehen. Anfangs wurden als Sonden dünne Platindrähte verwendet. Diese störten jedoch in Wasserstoff die Schichtbildung in so hohem Grade, daß es nur in wenigen Fällen möglich war, Potentialmessungen auszuführen. Die Störung durch Platinsonden in Wasserstoff scheint auf einem Vorgang zu beruhen, der mit der Fähigkeit des Platins, Gase zu absorbieren oder an seiner Oberfläche zu verdichten, zusammenhängt. Es trat nämlich die eigenartige Erscheinung auf, daß die Sonden jedesmal, wenn das Rohr längere Zeit ohne Entladung gestanden hatte, bei Eintritt der Entladung lebhaft zu glühen begannen. Nach längerem Entladungsdurchgang hörte das Glühen dann auf, trat aber regelmäßig wieder ein, wenn die Entladung längere Zeit ausgesetzt hatte.

An Stelle von Platin wurde späterhin Silber verwendet, bei welchem die Störung der Schichtbildung bedeutend geringer war. Bei dem aus gegossenen Zylindern zusammengesetzten Rohre von 200 mm Weite wurden die Silberdrähte von 0,05 mm Dicke quer durchs Rohr gespannt und zwischen die Schliffe geklemmt. Um bei einem engeren, geblasenen Rohr das zum Einblasen der Silbersonden erforderliche Platin

zu vermeiden, wurden längs des Rohres auf gegenüberliegenden Seiten dünne Glasröhrchen angesetzt und durch diese die Silberdrähte gezogen. Zum Verschließen der Röhrchen und gleichzeitigen Befestigen der Sonden diente Marineleim.

Die quergespannten Silberdrähte erwiesen sich als Sonden viel brauchbarer.

b) Die Bestimmung der Potentialdifferenzen.

Die Potentialdifferenzen zwischen zwei Sonden wurden auf zweierlei Methoden gemessen. Erstens wurden sie dynamisch bestimmt, indem eine isolierte Hochspannungsbatterie der Sondenpotentialdifferenz zur Kompensation entgegengeschaltet wurde (vgl. Fig. 2).

Die Batterie E mit 150 Elementen war durch zwei Rheostaten W und R von je 100000 Ohm kurz geschlossen. Am

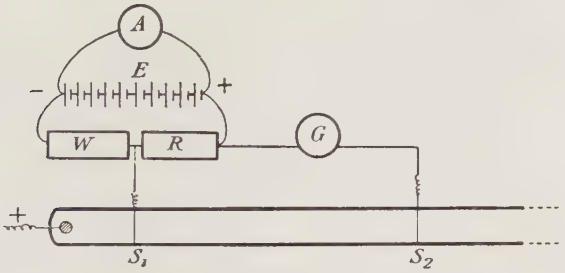


Fig. 2.

Rheostat R lagen die Sonden S_1 und S_2 mit einem zwischengeschalteten Galvanometer G von der Empfindlichkeit 10^{-7}, welches zur Vermeidung elektrostatischer Wirkungen mit einem an die Zuleitung $G\,S_2$ angeschlossenen Drahtnetz umgeben war. Die Potentialdifferenzen wurden durch die Nullmethode gemessen, indem der Rheostat R (ohne Störung der Isolation) so lange geändert wurde, bis das Galvanometer keinen Strom mehr zeigte. Aus der Abzweigung $R/W+R$ und der gleichzeitig mit einem Präzisionsvoltmeter gemessenen Klemmenspannung der Batterie wurde dann die Sondenpotentialdifferenz berechnet.

Gegen diese Methode könnte man einwenden, daß sie dadurch falsche Resultate liefere, daß sich eine der Sonden als

Kathode ausbilde mit selbständigem Potentialfall. Dem schien aber nicht so zu sein, da die Galvanometernadel bei Änderung des Widerstandes R stets stetig durch die Nullage hindurchging. Der Nachteil der Methode besteht hauptsächlich in der längeren Zeit, welche das Einstellen der Galvanometernadel auf Null durch Regulieren des Rheostaten R erfordert; denn wie schon oben erwähnt, sind die Verhältnisse im Entladungsrohr schwer längere Zeit völlig konstant zu bekommen.

Später wurden die Sondenpotentialdifferenzen statisch gemessen durch ein Quadrantelektrometer mit Luftdämpfung, dessen Aluminiumnadel an Golddraht von 0,02 mm Dicke, der gleichzeitig als Zuleitung zur Nadel diente, bifilar aufgehängt war. Das eine Potential wurde an die Nadel, das andere an ein Quadrantenpaar gelegt. Das Elektrometer wurde mit der Hochspannungsbatterie geeicht, an welcher gleichzeitig durch das Präzisionsvoltmeter die Spannung gemessen wurde. Die Empfindlichkeit betrug bei 80 Volt ein Skalenteil (objektive Skalenablesung) und bei 200 Volt 3 Skt. pro Volt. Als Entladungsverlust des Systems ergaben sich 3—5 Proz. pro Minute. Die Elektrometermethode hat außer der bedeutend geringeren Kapazität der ganzen Anordnung gegenüber der Kompensationsmethode hauptsächlich den Vorteil, daß sich eine Messung in äußerst kurzer Zeit ausführen läßt.

Ein Vergleich beider Methoden ergab, daß die gleichzeitig auf beiderlei Art gemessenen Werte der Potentialdifferenzen der Sonden nicht wesentlich verschieden sind. Jedoch waren die statisch bestimmten Werte im Mittel um $3^1/_2$ Proz. niedriger als die dynamisch gemessenen. Um festzustellen, ob hier ein Fehler in der Potentialmessung vorlag, wurde ein bekanntes Potential auf beiderlei Weise gemessen und dabei die Abweichung von $3^1/_2$ Proz. nicht gefunden. Es scheint also die Sondenpotentialdifferenz durch Anwendung der Kompensationsmethode doch etwas erhöht zu werden.

Eine Bestimmung der Schichtpotentialdifferenz wurde in der Weise vorgenommen, daß zunächst die Sondenpotentialdifferenz, dann der Schichtabstand und schließlich nochmals die Sondenpotentialdifferenz gemessen wurde. Die Resultate der beiden Potentialmessungen waren meist nicht voneinander verschieden. Bei geringen Abweichungen wurde der Mittel-

wert aus beiden genommen. Aus Schichtabstand, Sondenabstand und Sondenpotentialdifferenz wurde dann die Schichtpotentialdifferenz berechnet.

2. Die Diagramme.

An den verschiedenen Rohren wurden in Wasserstoff die Diagramme der Kurventafel IV (p. 44) erhalten (vgl. Tab. IV). Es bezeichnen da die Abszissen die Schichtpotentialdifferenzen und die Ordinaten die Stromstärken. Die den Kurven beigefügten Zahlen geben die Drucke an.

Das Diagramm, Taf. IV, *D* bezieht sich auf ein Rohr von 9,35 mm Radius mit quergespannten Platindrähten als Sonden, die sich in einem Abstand von 10 cm befanden. Die Sondenpotentialdifferenzen sind nach der Elektrometermethode gemessen. Die Ungleichmäßigkeiten der Kurven rühren jedenfalls von der schon oben erwähnten störenden Wirkung des Platins her.

Tabelle IV. Vgl. Kurventafel IV.

(Schichtpotentialdifferenz–Stromstärke.)

p = Druck in mm Hg; i = Strom in M.-A.; PD = Schichtpotentialdifferenz in Volt.

Rohrradius 30 mm (*A*).

p	i	PD	p	i	PD
0,906	9	24,36	0,286	15	11,42
	15	16,8		25	11,34
	25	15,45		50	11,12
	30	15,37	0,106	20	9,3
	40	15,16		35	9,13
	50	14,88		50	8,9
0,6	5	14,5	0,0472	20	8,71
	10	14,25		35	8,6
	20	13,4		50	8,4
	30	13,16	0,03	30	7,4
	50	12,47		50	7,4
0,432	7,5	12,66			
	10	12,46			
	20	11,95			
	30	11,85			
	50	11,45			

Tabelle IV. Vgl. Kurventafel IV.

(Schichtpotentialdifferenz–Stromstärke.)

p = Druck in mm Hg; i = Strom in M.-A.; PD = Schichtpotentialdifferenz in Volt.

Rohrradius 30 mm (B).

p	i	PD	p	i	PD
1,482	38	36,57	0,186	16	10,9
	45	32,56		20	10,44
	55	33,35		30	10,41
1,206	16	35,86		40	10,34
	20	28,4		50	10,3
	30	21,25		60	10,16
	40	17,46	0,132	20	9,76
	55	16,52		30	9,55
0,93	4,5	27,6		40	9,59
	7	25,3		50	9,56
	10	21,29		65	9,506
	15	17,13	0,09	20	9,52
	20	16,47		25	9,44
	30	15,68		30	9,3
	40	14,63		40	9,32
	60	14,08		50	9,24
0,624	6	14,93		65	9,1
	10	14,74	0,07	20	9,12
	15	13,5		25	8,96
	25	13,3		30	8,9
	40	13,06		40	8,63
	60	12,55		50	8,46
0,396	10	12,7	0,0576	20	8,81
	15	12,1		35	8,56
	20	11,99		60	8,5
	30	11,96			
	40	11,84			
	50	11,79			
	60	11,6			
0,32	10	11,45			
	15	11,37			
	20	11,28			
	30	11,24			
	40	11,05			
	50	11,01			
	60	10,91			

Tabelle IV. Vgl. Kurventafel IV.

(Schichtpotentialdifferenz–Stromstärke.)

p = Druck in mm Hg; i = Strom in M.-A.; PD = Schichtpotentialdifferenz in Volt.

Rohrradius 30 mm (C).

p	i	PD	p	i	PD
0,834	10	26,55	0,226	15	11,74
	12	20,84		20	11,53
	15	21,8		30	11,44
	20	19,77		45	11,27
	25	18,56		65	11,04
	30	16,24	0,166	20	10,98
	45	16,61		30	10,89
	65	16,61		45	10,81
0,696	11	21,19		65	10,64
	13	20,26		75	10,59
	15	17,39	0,136	20	10,17
	20	17		30	10,11
	25	16,64		45	10,05
	30	16,22		65	9,86
	45	14,5		75	9,8
	65	15,07	0,096	25	10,06
0,549	10	17,57		40	9,47
	12	16,08		55	9,46
	15	15,56		65	9,44
	20	15,15		75	9,35
	25	14,54	0,068	20	9,38
	30	13,99		30	9,12
	45	13,51		45	8,9
	65	13,43		60	8,8
0,435	10	14,65		75	8,88
	12	14,59	0,0456	30	8,31
	15	13,55		45	8,27
	20	13,67		60	8,49
	25	13,34		75	8,31
	40	12,75	0,042	35	8,2
	65	12,75		45	8,2
0,351	10	13,97		60	8,15
	12	12,97	0,033	45	8,2
	15	13,1		60	7,6
	20	12,74		75	7,8
	25	12,69	0,0246	80	7,4
	30	12,47		—	—
	45	12,15			
	65	12,19			
0,288	12	12,04			
	15	12,35			
	20	11,93			
	25	11,81			
	30	11,81			
	45	11,43			

Tabelle IV. Vgl. Kurventafel IV.

(Schichtpotentialdifferenz–Stromstärke.)

p = Druck in mm Hg; i = Strom in M.-A.; PD = Schichtpotentialdifferenz in Volt.

Rohrradius 9,35 mm (D).			Rohrradius 40 mm (E).		
p	i	PD	p	i	PD
0,68	2,5	12,69	0,42	5	24,5
	6,3	11,38		6	23,6
	10	11,2		6,2	21,2
	15	11,13		8	14
	25	10,8		10	14
	40	10,8			
	55	10,87	0,306	3,4	12,65
0,508				7	12,35
	3	11,81		10	12,18
	5	11,4		15	12
	10	10,88		24	11,75
	25	10,6			
	50	10,4	0,268	2,3	12,6
0,4				8,5	12,25
	4,5	11,03		12	11,5
	10	10,55		20	11,6
	20	10,2			
	60	10,25	0,198	3,5	11,9
0,226				5	11,5
	8	9,98		10	11,2
	15	10,3		20	11,1
	30	10			
	60	19,4	0,092	10	11,14
0,06				15	10,7
	12	9,38		20	10,7
	60	8,7?		25	10,7
			0,056	5,5	10,62
				10	9,7
				15	9,66
				20	9,69

Tabelle IV. Vgl. Kurventafel IV.

(Schichtpotentialdifferenz–Stromstärke.)

p = Druck in mm Hg; i = Strom in M.-A.; PD = Schichtpotentialdifferenz in Volt.

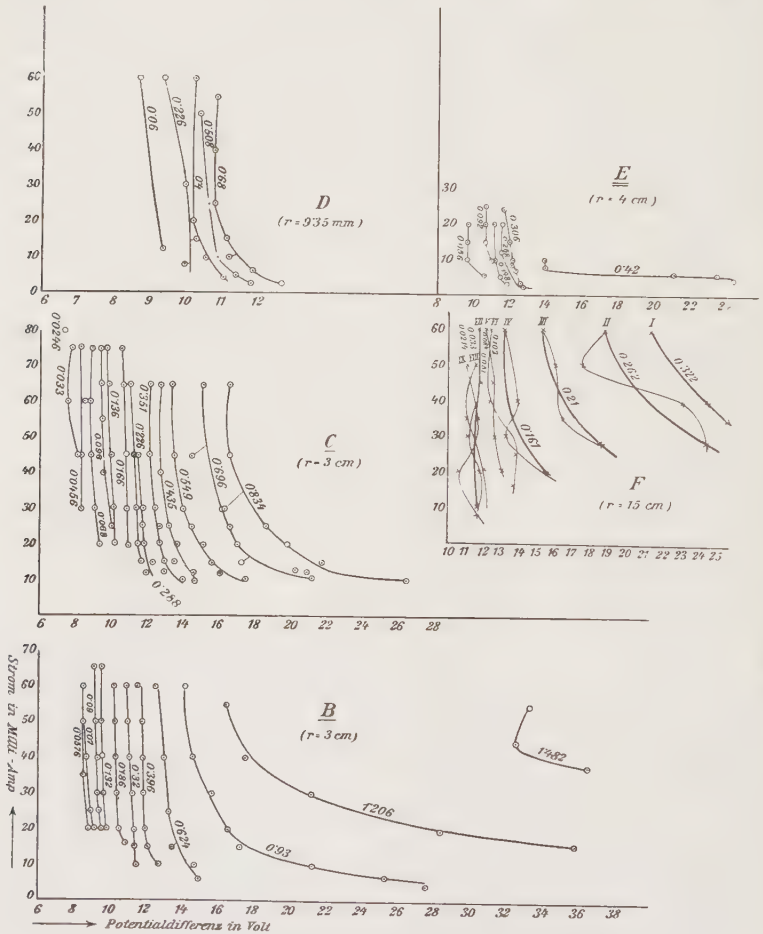
Rohrradius 100 mm (F).

p	i	PD	p	i	PD
0,322	30	27,59	0,084	16	13,78
	40	24,53		25	13,9
	60	21,43		40	12,53
				60	12,26
0,262	29	24,41			
	40	23,23	0,0508	10	11,79
	50	19,84		20	12,07
	60	18,84		30	11,4
				45	12
0,21	27	18,59		60	11,86
	35	16,35			
	50	16,12	0,0328	11	12,31
	60	15,32		20	12,09
				35	11,15
0,161	20	15,74		50	11,72
	30	13,33			
	40	13,99	0,0214	8	11,84
	60	13,19		20	10,65
				35	11,96
0,102	20	13,09		50	11,11
	30	12,68			
	45	12,6			
	60	12,16			

Das Diagramm, Taf. IV, E wurde mit dem Elektrometer an einem Rohr von 8 cm Weite erhalten mit zentralen Sonden aus Aluminium in einem Abstand von 50 cm. Die Unregelmäßigkeiten folgen hier zum größten Teil aus der Verschiebung und Deformation der Schichten durch die die Sondenzuleitung isolierenden Glasröhrchen, welche bis zur Rohrachse reichten.

Das Diagramm, Taf. IV, F gibt die an dem Rohre von 20 cm Durchmesser gemessenen Schichtpotentialdifferenzen wieder. Als Sonden wurden quergespannte Silberdrähte von 0,05 mm Dicke im Abstand von 50 cm verwendet. Die Potentialdifferenzen wurden nach der Kompensationsmethode gemessen. Die bedeutenden Unregelmäßigkeiten der Kurven rühren weniger von Ungenauigkeiten der Potentialmessung her, vielmehr erklären sie sich aus der Schwierigkeit der Bestimmung des Schichtabstandes, die aus der Anordnung folgte, welche die

mit der Verwendung gegossener Rohre von so großer Weite verbundene Gefahr nötig machte. Das Rohr wurde nämlich in einen Drahtkäfig eingebaut, und so ließen sich die Fehler der Parallaxe bei der Bestimmung der Schichtabstände nicht völlig



Kurventafel IV. (*Schicht*potentialdifferenz–Stromstärke.)

vermeiden. Außerdem ist in weiten Gefäßen die Helligkeit der Schichten geringer und steht auch eine geringere Anzahl zum Messen zur Verfügung, so daß Beobachtungsfehler in höherem Grade zur Geltung kommen.

Außer den angegebenen Ursachen für die Unregelmäßigkeiten der Diagramme, Taf. IV, *D* bis *F* war bei den Messungen noch von großem Nachteil, daß nur zwei Sonden in den Rohren angebracht waren, so daß die zur Messung gelangenden Potentialdifferenzen an den Sonden je nach Druck und Stromstärke in weiten Grenzen schwankten und vielfach für das Elektrometer außerhalb des Bereichs guter Empfindlichkeit lagen.

Um all diese Nachteile möglichst zu vermeiden, wurde ein Rohr von 6 cm Weite hergestellt mit 6 Sonden in Form von quergespannten Silberdrähten, die sich in den Abständen 10, 10, 10, 20, 30 cm befanden, damit man stets Potentialdifferenzen bekommen konnte, die im brauchbaren Meßbereich des Elektrometers lagen.

Die Diagramme, Taf. IV, *B* und *C* sind das Ergebnis von zwei an diesem Rohr ausgeführten Meßreihen. Die hier noch auftretenden Unregelmäßigkeiten der Kurven bei hohen Drucken sind jedenfalls verursacht durch die ungenügende Isolation der Ankerwickelungen an den Dynamos, während bei niedrigsten Drucken durch ungenaue Werte der Schichtabstände Fehler entstehen, da die Schichten dann nicht mehr scharf begrenzt sind, sondern oft nur durch Minima der Helligkeit längs der positiven Säule angedeutet sind. Einige gemessene Werte, welche größere Abweichungen zeigen, sind daher in die Diagramme nicht eingetragen.

3. Schichtpotentialdifferenz und Stromstärke.

Die Diagramme der Tafel IV zeigen, daß sich die Schichtpotentialdifferenz mit wachsendem Strom abnehmend einem konstanten Wert nähert. Es besteht also hier eine ähnliche Beziehung zur Stromstärke wie für den Schichtabstand.

4. Schichtpotentialdifferenz und Druck.

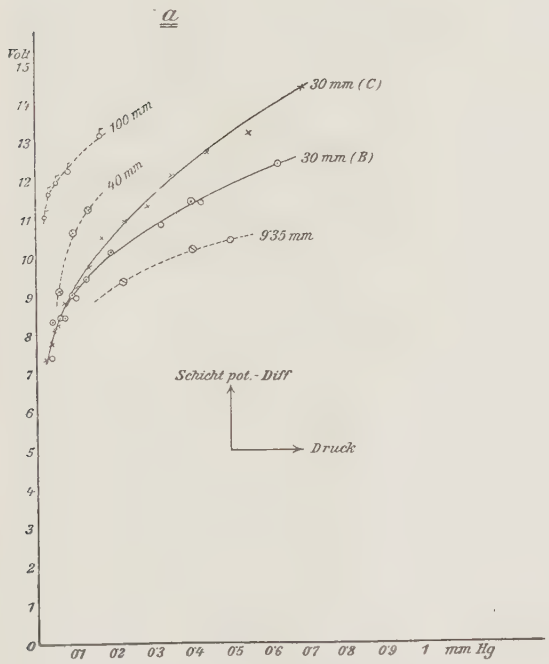
Von den Diagrammen, Taf. IV, sind nur die an dem Rohr von 6 cm Weite erhaltenen (*B* und *C*) geeignet, eine genauere Vorstellung davon zu geben, welchen Einfluß die Gasverdünnung auf den Wert der Schichtpotentialdifferenz besitzt. Da die Schichtpotentialdifferenz bei genügend hoher Stromstärke von dieser nicht mehr beeinflußt wird, so ist dadurch

die Möglichkeit gegeben, die Beziehung zwischen dem Druck und dieser konstanten Schichtpotentialdifferenz zu erkennen.

Das Diagramm *a* auf Taf. V (p. 47) enthält die Kurven, deren Ordinaten die konstanten Schichtpotentialdifferenzen und deren Abszissen die Drucke bedeuten. Es zeigt sich hier, daß die Resultate der zwei verschiedenen Versuchsreihen *B* und *C* besonders bei höheren Drucken sich nicht vollständig decken, sondern Abweichungen bis zu 10 Proz. auftreten. Diese Erscheinung könnte man vielleicht zurückführen auf den Umstand, daß der Wasserstoff von Hg-Dampf und Kohlenwasserstoffen zu stark verunreinigt war. Dann müßten die Abweichungen um so größer sein, je niedriger der Druck ist, da ja der Partialdruck der Verunreinigungen gegenüber dem des Wasserstoffs dort größer ist. Das Diagramm widerspricht dem. Eine Erklärung ist vielleicht darin zu suchen, daß bei höheren Drucken infolge der erforderlichen hohen Stromstärken trotz der Schnelligkeit der Messung noch bedeutende Temperatursteigerung eintrat, und daß die Temperaturen bei beiden Meßreihen wahrscheinlich verschieden waren, was dann auch eine Verschiedenheit der Schichtpotentialdifferenzen zur Folge haben muß, indem Temperatursteigerung die Schichtpotentialdifferenz verringert. Um Resultate zu erhalten, welche die erwähnten Abweichungen nicht zeigen, müßten Vorkehrungen getroffen werden, die verhindern, daß die Temperaturen in zu weiten Grenzen schwanken. Da dies bei den vorliegenden Versuchen nicht geschah, so ist ihr Wert nur ein beschränkter.

Trotzdem ist aber aus den Diagrammen deutlich zu ersehen, daß die Schichtpotentialdifferenz mit abnehmendem Druck abnimmt, und zwar um so rascher, je niedriger die Drucke liegen.

Um eine Gesetzmäßigkeit für die Abhängigkeit der konstanten Schichtpotentialdifferenzen vom Druck zu finden, wurden die Werte der Kurven, Taf. V *a*, *B* und *C* logarithmisch aufgetragen. Diagramm, Taf. V *b* zeigt die Logarithmen der Drucke als Abszissen, die der Schichtpotentialdifferenzen als Ordinaten. Dadurch gehen die Kurven anscheinend in Gerade über, die nahezu dieselbe Neigung gegen die Abszisse haben und die Ordinate etwa im Abstand 1,17 (für *C*) schneiden. Die Tangente dieser Neigung ist 0,195.



Kurventafel V.

Wenn wir den Druck mit p, die Schichtpotentialdifferenz mit V, die erwähnte Neigungstangente mit λ und den Abschnitt der Ordinate mit $\log \varkappa$ bezeichnen, so ist

$$\log V = \lambda \log p + \log \varkappa;$$

die Abhängigkeit der konstanten Schichtpotentialdifferenz vom Druck läßt sich also darstellen durch die Funktion:

$$\underline{V = \varkappa . p^{\lambda},}$$

wo für die vorliegenden Verhältnisse:

$$\lambda = 0{,}195, \quad \varkappa = 14{,}8.$$

Die Beziehung zwischen Schichtpotentialdifferenz und Druck läßt sich ferner durch eine andere Funktion ausdrücken, die nach Vorschlag des Hrn. Prof. Wiener in folgender Weise abgeleitet werden kann.

Die Beschleunigung eines Elektrons mit der Ladung ε ist in erster Linie abhängig vom Potentialgradienten in der Richtung der Entladung dV/dx. Jedoch läuft das Elektron im Feld nicht völlig frei, sondern es wird durch Stöße gegen Moleküle auf seiner Bahn gehemmt. Diese Hemmung setzen wir proportional der mittleren Stoßzahl, also proportional dem Druck p, $\varkappa' . p$. Wenn dann m die Masse des Elektrons und v seine Geschwindigkeit bedeutet, so können wir für die Beschleunigung des Elektrons folgende Differentialgleichung aufstellen:

$$m \frac{dv}{dt} = \varepsilon \frac{dV}{dx} - \varkappa' p. \tag{1}$$

Nach der Umformung:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx},$$

$$m . v \frac{dv}{dx} = \varepsilon \frac{dV}{dx} - \varkappa' p \tag{2}$$

läßt sich die Gleichung integrieren, und zwar integrieren wir über die Länge eines Schichtabstandes (l) von Schichtkopf zu Schichtkopf.

$$\frac{m}{2}(v^2 - v_0^2) = \varepsilon (V - V_0) - \varkappa' p l, \tag{3}$$

$V - V_0$ bedeutet also hier die Spannungsänderung längs einer Schicht, es ist die Schichtpotentialdifferenz. Wir bezeichnen sie mit V_e.

Die Größe $m/(2)(v^2 - v_0^2)$ deuten wir in folgender Weise: In den leuchtenden Schichtköpfen bewirken die Elektronen Ionisation durch Ionenstoß. Um durch Stoß ionisieren zu können, muß das Elektron eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit besitzen, die es dann beim Ionisierungsstoß verliert, indem es beim Erzeugen von Ionen kinetische Energie verbraucht. Nach dem Stoß hat das Elektron dann wieder die Geschwindigkeit v_0 und durchläuft von neuem einen Schichtabstand, um die Ionisierungsgeschwindigkeit wieder zu erlangen. Es bedeutet also $m/(2)(v^2 - v_0^2)$ die kinetische Energie, die bei der Ionisation durch Stoß verbraucht wird, die Ionisierungsenergie. Dieser Energie würde eine vom Elektron frei durchlaufene Potentialdifferenz V_i entsprechen, so daß wir schreiben können:

$$\frac{m}{2}(v^2 - v_0^2) = \varepsilon V_i .$$

V_i ist dann die sogenannte Ionisierungsspannung, d. h. der Spannungsabfall, der, frei durchlaufen, dem Elektron die Ionisierungsenergie erteilt.

Wir schreiben nun Gleichung (3) in der Form:

$$\varepsilon V_i = \varepsilon V_e - \varkappa' . p . l . \tag{4}$$

Hierin ist noch der Schichtabstand (l) vom Druck (p) abhängig. Nach dem ersten Abschnitt dieser Arbeit besteht zwischen Druck und Schichtabstand die Goldsteinsche Beziehung:

$$l = \frac{c}{p^m} .$$

Setzen wir dies in Gleichung (4) ein, so erhalten wir

$$\varepsilon V_i = \varepsilon V_e - \varkappa' c . p^{1-m} ,$$

oder wenn wir die Konstanten $\varepsilon \varkappa' c$ zu einer vereinigen:

$$V_i = V_e - C' p^{1-m} ,$$

$$\underline{V_e = V_i + C' p^{1-m} .}$$

Folgende Berechnungen der Größen V_i und C' nach den Zahlenangaben, welche den Kurven B und C, Taf. IV zugrunde liegen, zeigen, inwieweit diese Funktion dem Beobachtungsmaterial entspricht. m ist nach dem ersten Abschnitt für $H_2 = 0{,}53$.

Versuchsreihe			
B		C	
Mittelwert für C'			
8		10,83	
p	V_i	p	V_i
0,93	6,37	0,834	6,65
0,624	6,2	0,696	5,87
0,396	6,42	0,549	5,33
0,32	6,32	0,435	5,23
0,186	6,57	0,351	5,58
0,132	6,34	0,288	5,47
0,09	6,52	0,226	5,72
0,07	6,3	0,166	5,94
0,0576	6,4	0,136	5,56
		0,096	5,76
		0,068	5,84
		0,0456	5,76
		0,033	5,43
		0,0246	5,5
Mittel:	6,38	Mittel:	5,69

Die Ionisierungsspannung beträgt also für Wasserstoff etwa 6 Volt. Die Abweichungen der beiden Versuchsreihen B und C sind hauptsächlich auf Temperaturunterschiede bei den Messungen und auf ungenügende Reinheit des Wasserstoffs zurückzuführen.

Die Erscheinung der Schichtenbildung läßt sich nun in der Weise deuten, daß eine neue Schicht gebildet wird, sowie die von der vorhergehenden Schicht gebildeten Elektronen die Ionisierungsspannung erreicht haben.

Inwieweit der für die Ionisierungsspannung gefundene Wert von 6 Volt mit anderen Ergebnissen übereinstimmt, zeigen folgende Angaben:

Townsend[1]) berechnete aus der Potentialdifferenz, die an zwei Kondensatorplatten angelegt werden muß, damit die Leitfähigkeit des dazwischen befindlichen, durch Röntgenstrahlen

1) Townsend, Phil. Mag. 6. p. 215. 1901.

ionisierten Gases durch Ionenstoß erhöht wird, die Ionisierungsspannung der Elektronen in Luft zu mindestens 5 Volt.

Die Ionisierungsspannung steht in naher Beziehung zu der Arbeit, welche erforderlich ist zur Loslösung eines Elektrons aus dem Molekularverband. Aus der Abgabe von negativer Elektrizität aus erhitztem Platin fand Richardson[1]) für diese Arbeit 4,1 Volt und H. A. Wilson[2]) 5,74 Volt.

In Anbetracht der Verschiedenheit der Methoden, mit deren Hilfe diese Zahlen gewonnen sind, scheint ihre Übereinstimmung mit dem oben auf direkterem Wege gewonnenen Wert bemerkenswert.

5. Schichtpotentialdifferenz und Rohrweite.

Es steht nun noch die Frage offen, in welcher Weise die Schichtpotentialdifferenz von der Rohrweite abhängig ist. Eine genaue Form dieser Beziehung läßt sich nach dem vorliegenden Beobachtungsmaterial nicht geben, da die an anderen Rohren gemessenen Werte aus den oben dargelegten Gründen nicht hinreichende Genauigkeit besitzen. Jedoch war es möglich, einige Teile der Kurven, Schichtpotentialdifferenz–Druck, für andere Rohrweiten anzugeben. Sie sind mit beigefügtem Rohrradius in das Diagramm, Taf. V*a* mit eingetragen. Danach ist deutlich zu erkennen, daß die bei maximalem Strom konstanten Schichtpotentialdifferenzen bei denselben Drucken um so größer sind, je größer der Rohrradius ist.

Es liegt nahe, aus der Funktion

$$V_e = V_i + \varkappa' p l$$

eine Abhängigkeit der Schichtpotentialdifferenz vom Rohrradius herzuleiten, indem man den für l im ersten Teil dieser Arbeit gefundenen Ausdruck $c(r^{1-m}/p^m)$ einsetzt, wodurch man eine Funktion bekäme von der Form:

$$V_e = V_i + \varrho (r \cdot p)^{1-m}.$$

An dem vorliegenden Beobachtungsmaterial für andere Rohrweiten ließ sich jedoch nur feststellen, daß es einer Gültigkeit

1) Richardson, Phil. Trans. **201**. p. 518. 1903.
2) H. A. Wilson, Phil. Trans. **202**. p. 259. 1903.

dieser Beziehung nicht widerspricht, vielmehr teilweise darauf hindeutet.

Ergebnisse.

(Die für den Schichtabstand erhaltenen Ergebnisse sind auf p. 32 zusammengestellt.)

1. Bei gegebenem Druck nehmen die Schichtpotentialdifferenzen mit wachsendem *Strom* ab auf einen konstanten Wert.

2. Die Abhängigkeit dieser konstanten Werte (V) vom *Druck* (p) läßt sich darstellen:

a) durch die Funktion:

$$V = \varkappa p^{\lambda},$$

wo für die vorliegenden Verhältnisse (Wasserstoff in einem Rohr von 6 cm Durchmesser) für λ der Wert 0,195 und für $\varkappa$ der Wert 14,8 gefunden wurde;

b) durch die Funktion:

$$V = V_i + C' p^{1-m},$$

wo m der Exponent des Goldsteinschen Gesetzes ist (vgl. p. 5 und 32). Für zwei verschiedene Versuchsreihen an dem Rohr von 6 cm Durchmesser ist

$$C' = 8 \quad \text{bzw.} \quad 10{,}83,$$
$$V_i = 6{,}38 \quad „ \quad 5{,}69.$$

V_i bedeutet die Ionisierungsspannung des Elektrons für Wasserstoff, ihr Wert liegt bei etwa 6 Volt.

3. Mit zunehmender *Rohrweite* werden die Schichtpotentialdifferenzen unter sonst gleichen Verhältnissen größer.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuche wurden im Physikalischen Institut der Universität Leipzig ausgeführt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, auch an dieser Stelle Hrn. Prof. Dr. Wiener sowie Hrn. Privatdozent Dr. Jaffé für die vielfachen Anregungen und die stete Unterstützung, die mir die genannten Herren während meiner Arbeiten zuteil werden ließen, meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Lebenslauf.

Friedrich Ehregott Wehner, geboren am 30. Juli 1883 in Sornzig als Sohn des Pfarrers Wehner, ev.-luth. Konfession, besuchte von Ostern 1896 an das Fürstliche Gymnasium in Schleiz, welches er Ostern 1903 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Er studierte dann Mathematik und Naturwissenschaften an den Universitäten Leipzig und Kiel und bestand die Prüfung für Kandidaten des Lehramts an höheren Schulen am 21. Juli 1908 vor der Kgl. Prüfungskommission zu Leipzig, worauf er an der dritten städtischen Realschule in Leipzig sein Probejahr ableistete.